

## 钎杆内孔的液压低频振动扩孔工艺实验\*

徐林红, 刘志凡, 高尚, 饶建华

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为完全去除中空钢钎杆内孔表面的氧化层和裂纹层的影响,采用深孔扩孔的方式加工钎杆内孔。针对深孔扩孔过程中存在的切屑排出困难、切削温度高、内孔表面加工质量差等问题,利用液压低频振动辅助枪钻对中空钢钎杆进行深孔扩孔,研究振动参数及加工参数对切屑形态、内孔表面质量、切削热的影响。实验结果表明:在转速为500 r/min、进给量为0.1 mm/r条件下,相对于普通扩孔,液压低频振动扩孔可减小切屑尺寸,减少切屑表面锯齿边缘现象,优化内孔加工表面,减少刀痕和划痕,降低加工温度。且当频率为36.7 Hz、振幅为0.58 mm时,切屑尺寸最小,内孔表面划痕最少,加工温度最低;随着进给量在0.80~0.12 mm/r范围内增大,切屑长度变大,内孔表面的刀痕和划痕增多;转速对切屑长度及内孔表面形貌影响较小。

**关键词:**钎杆;低频振动;扩孔;液压激振器;加工质量

中图分类号: TG506.5 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2021)02-117-08

## Experiment on hydraulic low frequency vibration reaming process of drill rod inner hole

XU Linhong, LIU Zhifan, GAO Shang, RAO Jianhua

(School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To completely remove oxide layer and crack layer on the inner surface of the hollow steel drill rod, deep hole reaming was processed on the inner hole of the drill rod. In view of the problems of chip discharge difficulty, high cutting temperature and poor processing quality of the inner hole surface during deep hole reaming, hydraulic low-frequency vibration assisted gun drill was adopted to improve the hole surface quality here. Experiments results showed that compared with the ordinary reaming, the hydraulic low-frequency vibration reaming can reduce the chip size and the jagged edge phenomenon on the chip surface, improve the inner hole machining surface, reduce the tool marks and scratches and the processing temperature under the condition of the speed of 500 r/min and the feed rate of 0.1 mm/r. Furthermore, the minimal clip size with least scratches and lowest processing temperature could be achieved when the frequency reaches 36.7 Hz with vibration amplitude at 0.58 mm. With the increase of the feed rate within the range of 0.80~0.12 mm/r, the length of chip becomes larger, and the tool marks and scratches on the surface of the inner hole increase. The speed has little effect on the chip length and the surface quality of the inner hole.

**Keywords:** drill rod; low frequency vibration; reaming; hydraulic vibrator; processing quality

钎杆是井巷工程连接钻头和凿岩的机具,矿山井巷工程中使用的钎杆一般多为六角中空钢和圆形中空钢。中空钢钎杆在热轧成形过程中,其内孔表面容易产生0.1~0.3 mm深度的脱碳层和裂纹层,而使得钎杆强度降低,从而影响钎杆的使用寿命<sup>[1-3]</sup>。目前国内外常用的解决方法是内孔防腐处理<sup>[4]</sup>和内衬合金管处理<sup>[5]</sup>,但这两种方法只是覆盖裂纹,延缓裂纹扩散的时间,并不能根除钎杆孔内的脱碳层和裂纹层。为完全去除脱碳层和裂纹层的影响,本文采用扩孔工艺对中空钢钎杆内孔表面进行加工,从而达到完全去除脱碳层和裂纹层的目的。由于钎杆内孔的长径比为

30~100,属于典型的深孔加工。同时H22-SiMnCrNiMo中空钢钎杆为中碳硅锰结构钢,钎杆中的Cr元素会增加刀具和材料之间的黏结性能,钎杆中的Ni元素会产生加工硬化。上述情况将导致在扩孔过程中出现排屑困难、切削温度高、加工精度低、刀具寿命短等问题。针对以上问题,本文利用振动扩孔的方式来去除钎杆内孔中的脱碳层和裂纹层。

目前研究振动扩孔的文献较少,但对振动钻削的研究则比较深入。由于两者都属于典型的孔加工工艺,因此对振动扩孔的研究可借鉴振动钻削工艺。振动钻削是在加工孔过程中为钻头(或

\* 收稿日期:2019-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22078296)

作者简介:徐林红(1970—),女,湖北潜江人,副教授,博士,E-mail:xulinhong@cug.edu.cn

工件)增加规则和受控的振动,从而可以周期性改变切削量。Okamura 等<sup>[6]</sup>对 Ti-6Al-4V 进行低频振动钻削实验,发现低频振动钻削会减小切屑厚度、降低钻孔温度。Debnath 等<sup>[7]</sup>使用 TriboMAM 刀具对碳纤维增强基复合材料(Carbon Fibre-Reinforced Polymer, CFRP)层压板进行频率振幅可调的振动钻削实验,发现脉冲式钻削特性可降低加工温度,提高内孔表面的加工质量。Bleicher 等<sup>[8]</sup>采用液压磁浮轴承系统对 CFRP/C45E 进行低频振动钻削实验,发现低频高振幅会更容易产生短切屑,同时会减少工件边缘毛刺的形成和刀具磨损。Paulsen 等<sup>[9]</sup>使用电磁激振器对 Al7075 进行低频振动钻削实验,发现振动轨迹为正弦曲线时可以改变切屑形状。Lotfi 等<sup>[10]</sup>采用超声振动辅助钻削 45 号钢,发现超声振动减少了工件和钻头之间的传热时间,且产生更短的切屑。Sugihara 等<sup>[11]</sup>提出了利用超低频振动进行切削,超低频振动范围为 1 ~ 10 Hz。实验结果表明:在干加工条件下,此方法显著减少了加工中的月牙洼磨损。

目前针对振动钻削的研究大多集中在钻削深度小、采用麻花钻的振动钻削,对于深孔的振动钻削工艺研究较少。由于低频振动比高频振动能够更加有效地控制断屑,因此在振动频率的选择上本文选择低频振动。目前常用的低频激振器包括电磁激振器、机械激振器和液压激振器等,其中液压式激振器由于输出功率大、负载能力强、振幅频率调节方便、性能稳定,更适合本文中的深孔扩孔加工条件。因此,本文借鉴低频振动钻孔工艺,采用液压低频振动辅助枪钻对中空钢钎杆进行深孔扩孔,研究振动参数对扩孔表面质量、断屑情况及钻削温度的影响和加工参数对振动扩孔表面质量、断屑情况的影响。

## 1 实验条件

### 1.1 低频振动钻削的完全几何断屑条件

振动钻削中若被切削层的厚度能够达到零,即刀具和工件完全分离,在一定的时间内不存在切削层的厚度,属于完全几何断屑。满足完全几何断屑条件时,最小轴向切削厚度  $h_{\min} < 0$ ,可表示为:

$$h_{\min} = f - 2A \sin\left(\frac{F}{n} - K\right) \pi < 0 \quad (1)$$

即

$$\frac{f}{A} < 2 \sin\left(\frac{F}{n} - K\right) \pi \quad (2)$$

其中: $f$ 是进给量,单位为 mm/r; $n$ 是主轴转速,单位为 r/min; $A$ 为振动的振幅,单位为 mm; $F$ 为振

动频率,单位为 Hz; $K$ 为工件旋转一周包含的完整振动周期数目。

经过计算,当转速为 500 r/min、进给量为 0.10 mm/r 时,达到完全几何断屑的振动频率范围是 18.1 ~ 23.6 Hz、26.4 ~ 31.9 Hz 和 35.7 ~ 41.2 Hz,振幅最大值需大于 0.05 mm。

### 1.2 工作台搭建及振动参数确定

本实验采用的液压低频激振器装置结构如图 1 所示,包括振动轴、弹簧、活动阀门、振动器主体。调速电机旋转带动活动阀门旋转,实现液路的导通与关断,液路关断时液腔内液压骤增发生液击现象,高压产生的脉冲力使活塞向下运动压缩弹簧,液路导通时活塞受弹簧力作用向上运动,液路周期性地导通与关断,振动轴受迫上下运动形成振动。该激振器可通过调节调速电机转速控制振动频率,通过调节泵站液压控制振动振幅。

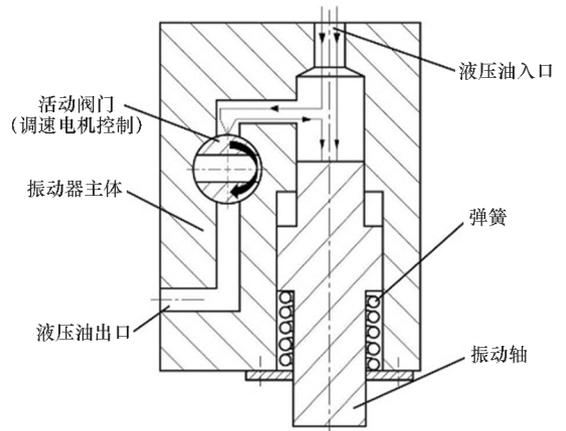


图 1 液压激振器内部结构

Fig. 1 Hydraulic vibrator internal structure

振动扩孔实验在 CA6140 车床上完成,液压激振器、液压泵站、激振器固定架等的安装如图 2 所示。将激振器安装在原车床刀架的位置,枪钻通过刀具夹头固定于激振器振动轴处,钎杆试样装夹在机床三爪卡盘上,枪钻末端利用中心架进行辅助支撑,安装时需保持激振器振动轴轴心、枪钻轴心和钎杆试样轴心处于同一条水平直线上。

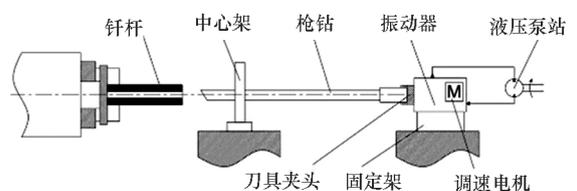


图 2 液压振动扩孔工作台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hydraulic vibration reaming platform

激振器频率及振幅测量系统如图3所示。系统主要由位移传感器、压力传感器、数据采集卡、数据采集器、计算机和相关附件组成。在本实验中,位移传感器和压力传感器安装于激振器振动轴前端。位移传感器用于测量激振器振动轴前端的位移,即激振器的振幅。压力传感器用来测量振动器输出端的压力特性。

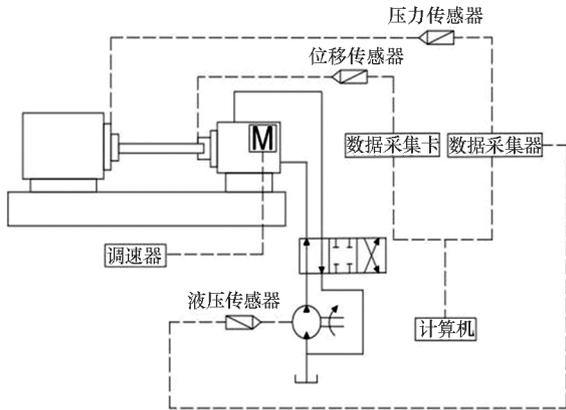


图3 激振器频率与振幅测量系统

Fig.3 Measurement system of vibrator frequency and amplitude

由于位移传感器固定在机床上,枪钻的进给运动会影响激振器振幅测定。因此,激振器振幅需要在静态时测得。为大致确定钻削力范围,在转速为500 r/min、进给量为0.10 mm/r的普通扩孔条件下,对内孔直径为10 mm的钎杆内孔进行扩孔实验,利用测力仪测得轴向力约为500 N。根据上述完全几何断屑条件及激振器的工作频率,本实验设置的频率为20.4 Hz、28.2 Hz、36.7 Hz。在此3种频率下,对负载为500 N的激振器的振幅进行测试。测试结果分别为:频率为20.4 Hz时,振幅为1.11 mm;频率为28.2 Hz时,振幅为0.89 mm;频率为36.7 Hz时,振幅为0.58 mm。

## 2 实验材料及实验方法

实验所用试样为某钢厂生产的H22-SiMnCrNiMo中空钢钎杆,属中碳硅锰结构钢,其各元素质量分数如表1所示。经测试,该试样表面硬度为50HRC,芯部硬度为40HRC。试样横截面外轮廓为正六边形,对边长度为35 mm,中心为直径为10 mm的通孔,长度为0.3 m和0.5 m,热轧成形后的中空钢钎杆及其内孔表面如图4所示。

表1 钎杆各元素质量分数

Tab.1 Chemical composition of the drill rod

%						
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0.220	0.700	0.280	0.018	0.010	1.220	2.650
W	Mo	V	As	Ti	Al	Cu
0.010	0.230	0.010	0.025	0.010	0.020	0.120

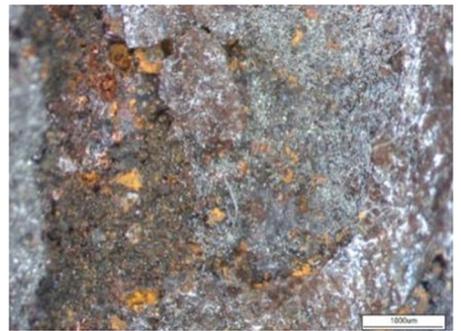
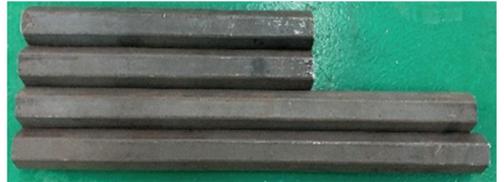


图4 热轧成形后的中空钢钎杆及其内孔表面

Fig.4 Hollow steel drill rod and its inner hole surface after hot rolling process

实验选用整体硬质合金单刃枪钻,尺寸为 $\Phi 12\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ ,尾部刀柄尺寸为 $\Phi 16\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ ,枪钻整体和主切削刃如图5所示。

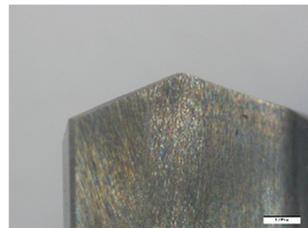


图5 硬质合金枪钻及其主切削刃

Fig.5 Carbide gun drill and its main cutting edge

本实验的目的是研究不同振动参数和加工参数如转速及进给量对加工过程的影响。根据完全几何断屑条件及激振器特性与车床特性,选取的实验参数分别如表2、表3和表4所示。

表 2 振动参数对加工过程影响实验方案

Tab. 2 Experimental scheme of the influence of vibration parameters on the machining process

组号	主轴转速/ (r/min)	进给量/ (mm/r)	频率/Hz	振幅/mm
1	500	0.10	0	0
2	500	0.10	20.4	1.11
3	500	0.10	28.2	0.89
4	500	0.10	36.7	0.58

表 3 进给量对加工过程影响实验方案

Tab. 3 Experimental scheme of the influence of feed rate on the machining process

组号	主轴转速/ (r/min)	进给量/ (mm/r)	频率/Hz	振幅/mm
1	500	0.08	36.7	0.58
2	500	0.10	36.7	0.58
3	500	0.12	36.7	0.58

表 4 转速对加工过程影响实验方案

Tab. 4 Experimental scheme of the influence of speed on the machining process

组号	主轴转速/ (r/min)	进给量/ (mm/r)	频率/Hz	振幅/mm
1	320	0.10	36.7	0.58
2	400	0.10	36.7	0.58
3	500	0.10	36.7	0.58

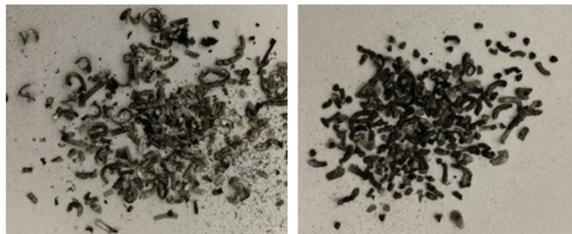
### 3 结果和分析

#### 3.1 切屑分析

##### 3.1.1 振动参数对切屑的影响

普通扩孔切屑主要为带状连续切屑和螺旋圆锥形切屑,切屑较长且卷曲严重,而低频振动扩孔切屑主要为扇形切屑、梯形切屑和 C 形切屑,切屑较短,如图 6 所示。在振动扩孔加工过程中,刀具与工件周期性的分离导致切屑底部瞬间氧化,减少了切屑与刀具之间的黏结,使断屑更容易产生。

在  $n = 500 \text{ r/min}$ 、 $f = 0.1 \text{ mm/r}$  条件下,相对于普通扩孔,低频振动扩孔切屑的锯齿边缘情况得到改善,且当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,锯齿边缘情况最轻,如表 5 所示。在普通扩孔加工过程中,积屑瘤和鳞刺的产生增大了零件表面粗糙程度,而低频振动扩孔可以减少积屑瘤与鳞刺现象,使刀具与工件之间摩擦程度减小,同时降低了加工时的扭矩。



(a)  $F = 0 \text{ Hz}, A = 0 \text{ mm}$  (b)  $F = 20.4 \text{ Hz}, A = 1.11 \text{ mm}$



(c)  $F = 28.2 \text{ Hz}, A = 0.89 \text{ mm}$  (d)  $F = 36.7 \text{ Hz}, A = 0.58 \text{ mm}$

图 6 不同振动参数扩孔加工切屑的总体图

Fig. 6 Overall diagram of chips under different vibration parameters

由于长度较大的切屑能够对缠屑和排屑产生较大的影响,因此对不同振动参数下扩孔加工中较长的切屑分别进行 10 次测量,结果如表 6 所示。在  $n = 500 \text{ r/min}$ 、 $f = 0.1 \text{ mm/r}$  条件下,相对于普通扩孔,低频振动扩孔的切屑长度更短,且当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,切屑长度最短。这是因为普通扩孔的切屑积累到足够长度达到应力极限会断屑,而振动扩孔在未达到应力极限前,由于切削厚度逐渐减小,切屑与工件连接处材料逐渐减少至零,形成断屑。当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,最大切削厚度最小,且切屑与工件连接处材料逐渐减少至零时所需的时间最短,因此切屑最短。

##### 3.1.2 进给量及转速对切屑的影响

表 7 和表 8 为  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$ 、 $n = 500 \text{ r/min}$  时,不同进给量下的切屑形态和切屑长度分别进行 10 次测量。当进给量在  $0.80 \sim 0.12 \text{ mm/r}$  范围内增大时,切屑的长度明显增大。这是由于随着进给量在  $0.80 \sim 0.12 \text{ mm/r}$  增大,最大切削厚度变大,引起切屑尺寸的增大。

表 9 和表 10 为  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$ 、 $f = 0.1 \text{ mm/r}$  时,不同转速下的切屑形态和切屑长度分别进行 10 次测量。可以看出,转速对振动扩孔加工切屑长度的影响不大。转速对切屑长度的影响主要通过影响频转比(即  $F/n$ ),从而影响相位差来实现。在频率一定的情况下,转速的变化只改变了切削速度,没有改变枪钻在一个周期内的振动次数,故转速对理论切屑长度影响不大。

表5 不同振动参数振动扩孔的切屑形状

Tab.5 Chip shapes of vibrating reaming under different vibration parameters

组号	取样1	取样2	取样3	取样4
1				
2				
3				
4				

表6 不同振动参数下的切屑长度

Tab.6 Chip lengths under different vibration parameters

单位:mm

组号	测量次数										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	9.716	9.449	8.977	9.126	9.279	8.932	8.536	8.902	8.890	8.377	9.018
2	3.465	3.268	3.178	3.470	3.157	3.177	3.412	3.390	3.315	3.341	3.317
3	2.421	2.658	2.492	2.331	2.441	2.598	2.565	2.300	2.607	2.443	2.486
4	1.769	1.806	1.768	1.915	1.770	1.931	1.792	1.902	1.779	1.807	1.824

表7 不同进给量下的切屑形态

Tab.7 Chipshapes under different feed rates

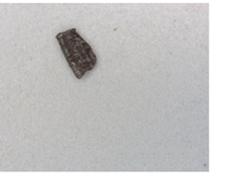
组号	取样1	取样2	取样3	取样4
1				
2				
3				

表 8 不同进给量下的切屑长度

Tab.8 Chip lengths under different feed rates

单位:mm

组号	测量次数										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1.433	1.367	1.562	1.409	1.364	1.422	1.481	1.227	1.403	1.303	1.397
2	1.769	1.806	1.768	1.915	1.770	1.931	1.792	1.902	1.779	1.807	1.824
3	2.480	1.797	1.853	1.704	2.313	2.008	1.975	1.913	2.340	2.651	2.103

表 9 不同转速下的切屑形态

Tab.9 Chip shapes under different speeds

组号	取样 1	取样 2	取样 3	取样 4
1				
2				
3				

表 10 不同转速下的切屑长度

Tab.10 Chip lengths under different speeds

单位:mm

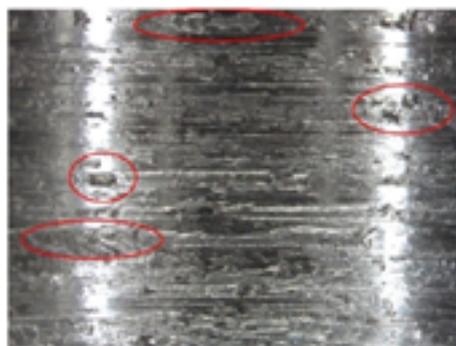
组号	测量次数										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1.710	1.730	1.916	1.638	1.863	1.828	1.615	1.939	1.829	1.702	1.817
2	2.198	1.714	1.930	2.114	1.965	2.169	1.655	1.858	2.088	1.819	1.951
3	1.769	1.806	1.768	1.915	1.770	1.931	1.792	1.902	1.779	1.807	1.824

### 3.2 表面形貌分析

#### 3.2.1 振动参数对内孔表面形貌的影响

以平行于孔轴线为基准,采用电火花线切割,对不同振动参数加工下的试样进行轴向剖分取样,并利用 NIKON SMZ745T 体视变焦显微镜对钎杆内孔表面进行观察。图 7 为不同振动参数下扩孔加工的内孔表面形貌。经过普通扩孔和低频振动扩孔加工,钎杆内孔表面的脱碳层与裂纹层都已完全去除。在  $n = 500 \text{ r/min}$ 、 $f = 0.1 \text{ mm/r}$  条件下,相对于普通扩孔加工,低频振动扩孔加工的内孔表面更光滑均匀,颗粒度低,无明显划痕、凸起和凹陷,其加工质量优于普通扩孔的情况,且

当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,内孔表面刀痕和划痕最少。在普通扩孔加工过程中,积屑瘤和鳞刺会损伤内孔表面,而低频振动扩孔具有良好的断屑、排屑效果,避免了切屑与孔壁在摩擦过程中所产生的划伤,同时振动扩孔附加的轴向往复运动对加工工件产生一定的冲击,降低了刀具与工件间的挤压和摩擦,使金属材料更具脆性,减小了切削热的产生,降低了切削温度,从而减少了对内孔孔壁的划伤。此外,切屑的变长导致切屑在排出过程中会对孔壁表面造成划伤,产生沟槽。因此当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,内孔表面刀痕和划痕最少。



(a)  $F = 0 \text{ Hz}, A = 0 \text{ mm}$



(b)  $F = 20.4 \text{ Hz}, A = 1.11 \text{ mm}$



(c)  $F = 28.2 \text{ Hz}, A = 0.89 \text{ mm}$



(d)  $F = 36.7 \text{ Hz}, A = 0.58 \text{ mm}$

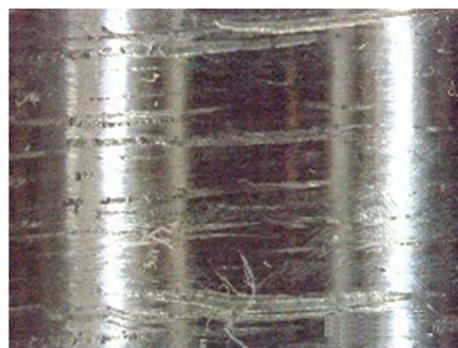
图7 不同振动参数下的内孔表面形貌

Fig.7 Inner hole surface topographies under different vibration parameters

### 3.2.2 进给量及转速对内孔表面形貌的影响

图8为  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$ 、 $n = 500 \text{ r/min}$ 时,不同进给量下的内孔表面形貌。当进给量在  $0.80 \sim 0.12 \text{ mm/r}$  范围内增大时,内孔

表面的刀痕和划痕增多。这是由于随着进给量的增大,切屑尺寸变大,切屑排出时划伤内孔表面的概率增大。



(a)  $f = 0.08 \text{ mm/r}$



(b)  $f = 0.10 \text{ mm/r}$



(c)  $f = 0.12 \text{ mm/r}$

图8 不同进给量下内孔表面形貌

Fig.8 Inner hole surface topographies under different feed rates

图9为  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$ 、 $f = 0.1 \text{ mm/r}$ 时,不同转速下的内孔表面形貌。转速对内孔表面形貌影响较小,主要影响内孔表面划痕的疏密程度。

### 3.3 加工温度分析

采用 DM6801A 接触式测温仪对枪钻刀尖处进行测温,图10为  $n = 500 \text{ r/min}$ 、 $f = 0.1 \text{ mm/r}$ 时,普通扩孔与低频振动扩孔加工时的刀具温度随时间变化图。在扩孔时间达到  $30 \text{ s}$ 时,各组温度均进入稳定阶段。在  $n = 500 \text{ r/min}$ 、 $f =$



(a)  $n = 320 \text{ r/min}$



(b)  $n = 400 \text{ r/min}$



(c)  $n = 500 \text{ r/min}$

图 9 不同转速下的内孔表面形貌

Fig. 9 Inner hole surface topographies under different speeds

0.1 mm/r条件下,相对于普通扩孔加工,低频振动扩孔加工可以明显降低加工温度,且当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,加工温度最低。这是由于振动扩孔断续加工的特性,刀具与工件周期性地分离使刀具在此时间段内得到一定的冷却。此外在加工过程中,较小的切屑可以被快速排出,并带走大量的切削热。当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,切屑最短,短切屑带走大量的切削热。因此,当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,加工温度最低。

### 4 结论

1) 在  $n = 500 \text{ r/min}$ 、 $f = 0.1 \text{ mm/r}$  条件下,相对于普通扩孔,液压低频振动扩孔可减小切屑尺

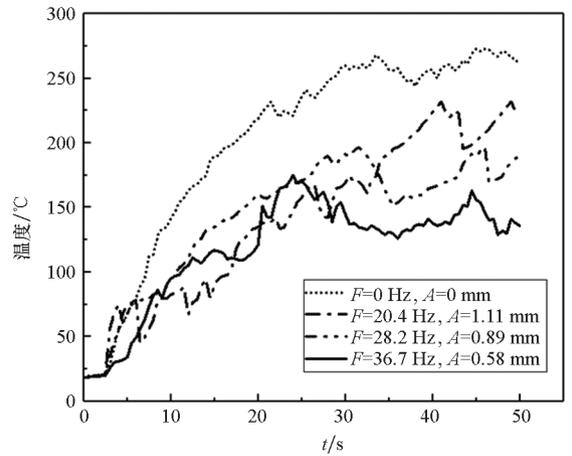


图 10 不同振动参数下的加工温度

Fig. 10 Processing temperatures under different vibration parameters

寸,减少切屑表面锯齿边缘现象,优化内孔加工表面,减少刀痕和划痕,降低加工温度。且当  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$  时,切屑尺寸最小,内孔表面划痕最少,加工温度最低。

2) 在  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$ 、 $f = 500 \text{ mm/r}$  条件下,随着进给量在 0.80 ~ 0.12 mm/r 范围内增大,切屑长度变大,内孔表面的刀痕和划痕增多。

3) 在  $F = 36.7 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.58 \text{ mm}$ 、 $f = 500 \text{ mm/r}$  条件下,转速对切屑长度及内孔表面形貌影响较小。

### 参考文献 (References)

[1] MORTON J. Underground drilling advances improve productivity, safety while cutting costs[J]. Engineering and Mining Journal, 2018, 219(1): 40 - 44.

[2] 徐斌, 唐文龙, 鲁玉祥. 国内外液压凿岩钻车用钎杆分析研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(24): 1 - 6.  
XU Bin, TANG Wenlong, LU Yuxiang. Analysis of drill rods for hydraulic rock drilling cars at home and abroad [J]. Mining Machine, 2010, 38(24): 1 - 6. (in Chinese)

[3] 洪灵达, 顾太和, 徐曙光, 等. 钎钢与钎具[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 108 - 110.  
HONG Lingda, GU Taihe, XU Shuguang, et al. Brazing steel and brazing tools[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 108 - 110. (in Chinese)

[4] EUGEN R B L. Corrosion resistant treatment for hollow drill rods: U. S. Patent 2875110[P]. 1959 - 02 - 24.

[5] 林鼎文. 提高小钎杆寿命的径途[J]. 华侨大学学报, 1981(1): 94 - 104.  
LIN Dingwen. Improve the life of small drill rods[J]. Journal of Huaqiao University, 1981(1): 94 - 104. (in Chinese)

- [16] ZHANG D Q, HAN X, JIANG C, et al. Time-dependent reliability analysis through response surface method [J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(4): 041404.
- [17] AMANDEEP S, ZISSIMOS P M, LI J. Design for lifecycle cost using time-dependent reliability [J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(9): 091008.
- [18] ZISSIMOS P M, MONICA M, VIJITASHWA P, et al. Time-dependent reliability analysis using the total probability theorem [J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137(3): 031405.
- [19] SAVAGE G J, SON Y K. Dependability-based design optimization of degrading engineering systems[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(1): 011002.
- [20] SON Y K, SAVAGE G J. Set theoretic formulation of performance reliability of multiple response time-variant systems due to degradations in system components[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2007, 23(2): 171-188.
- [21] JIANG C, HUANG X P, WEI X P, et al. A time-variant reliability analysis method for structural systems based on stochastic process discretization[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2017, 13(2): 173-193.
- [22] LI H S, WANG T, YUAN J Y, et al. A sampling-based method for high-dimensional time-variant reliability analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 126: 505-520.
- [23] YUAN X K, LU Z Z. Efficient approach for reliability-based optimization based on weighted importance sampling approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 132: 107-114.
- [24] 吕震宙, 宋述芳, 李洪双, 等. 结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
LYU Zhenzhou, SONG Shufang, LI Hongshuang, et al. Reliability and reliability sensitivity analysis of structural mechanism [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [25] OKASHA N M. An improved weighted average simulation approach for solving reliability-based analysis and design optimization problems[J]. Structural Safety, 2016, 60: 47-55.

---

(上接第 124 页)

- [6] OKAMURA K, SASAHARA H. Prediction of drilling temperature during low-frequency vibration drilling of titanium alloy[J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems & Manufacturing, 2017, 11(3): JAMDSM0036.
- [7] DEBNATH K, SINGH I. Low-frequency modulation-assisted drilling of carbon-epoxy composite laminates[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 262-273.
- [8] BLEICHER F, WIESINGER G, KUMPF C, et al. Vibration assisted drilling of CFRP/metal stacks at low frequencies and high amplitudes[J]. Production Engineering, 2018, 12(5): 1-8.
- [9] PAULSEN T, PECAT O, WAGNER A, et al. Modification of oscillation modes in low frequency vibration assisted drilling[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 14: 1-7.
- [10] LOTFI M, AMINI S. Experimental and numerical study of ultrasonically-assisted drilling [J]. Ultrasonics, 2017, 75(1): 185-193.
- [11] SUGIHARA T, ENOMOTO T. Ultra-low-frequency vibration assisted machining of Ti-6Al-4V alloy [J]. International Journal of Automation Technology, 2016, 10(4): 647-653.